ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 70 Вып. 2 1951

ИМПУЛЬСНАЯ РЕНТГЕНОГРАФИЯ

А.А. ВОРОБЬЕВ

В ряде случаев имеется необходимость фиксировать в пространстве положение тела, движущегося с большой скоростью в среде, непрозрачной для видимого света. Например, необходимо фотографировать движущиеся части машин, скрытые кожухом от непосредственного наблюдения, фиксировать отдельные этапы развития процесса взрыва, цепной реакции, движения снаряда внутри непрозрачного для видимого света облака газов, установление напряженного состояния кристаллической решетки при упругой деформации и проч. В этих случаях, когда видимый свет не дает возможности получить изображение, можно прибегнуть к помощи жесткого рентгеновского излучения.

Средняя скорость детонации взрывчатых веществ достигает 5000 *м/сек*. С такими же скоростями распространяются упругие ударные волны в стали.

Получение на рентгенограмме отчетливого неразмытого изображения, например, быстро летящей пули, возможно, если экспозиция будет порядка 10^{-5} сек и меньше. Генерирование рентгеновских лучей в течение такого короткого промежутка времени можно производить путем подачи на рентгеновскую трубку столь же кратковременного импульса напряжения. Другие возможные способы получения кратковременной вспышки рентгеновского излучения, направленного на объект, как-то: импульсное нагревание катода, рентгеновской трубки или открытие какой-то задвижки, помещенной между источником лучей и объектом, могут дать экспозицию, вероятно, порядка 10^{-4} сек и больше. При этом предполагается, что напряжение между электродами трубки приложено длительно, что имеет также свои слабые стороны сравнительно с импульсной подачей напряжения.

В 1937 г. автором статьи в высоковольтной лаборатории Сибирского физико-технического института были разработаны основы метода и схемы импульсной рентгенографии. Разработанная методика успешно применялась к исследованию ряда явлений, протекающих с большой скоростью, и была оформлена заявкой на авторское свидетельство 10 марта 1938 г. № 193/2 в Отделе по делам изобретений НКОП СССР.

Схема установки для импульсного генерирования рентгеновских лучей была предложена следующая: на рентгеновскую трубку синхронно с фиксируемым явлением в данный момент подается импульс напряжения от генератора импульсных напряжений.

Для производства рентгеновского снимка в течение короткого времени действия рентгеновских лучей необходимо иметь возможно большую интенсивность излучения, достаточную для того, чтобы пронизать объект и за фиксировать на фотопленке его теневое изображение.

Известно, что интенсивность полного рентгеновского излучения увеличивается пропорционально квадрату напряжения между электродами трубки (кривые Ульрея) и величине тока, протекающего через трубку (кривые Довийе).

Для уменьшения экспозиции при заданной интенсивности излучения необходимо применять фотопленки возможно большей чувствительности.

Применение нами ионной рентгеновской трубки с железным анодом, когда через трубку можно было пропускать большой импульсный ток порядка десятков ампер, показало, что при этих условиях вспышка на флуоресцирующем экране наблюдается только на расстоянии нескольких сантиметров от окна трубки. Напряжение на электродах трубки достигало 15–35 *кв*. Это обстоятельство весьма ограничивает применение такой установки. Стремясь использовать стандартную рентгеновскую аппаратуру для производства съемки с малой экспозицией, мы применили диагностические, терапевтические электронные рентгеновские трубки с накаливаемым катодом и трубки для рентгеновского структурного анализа.

В 1937 г. мы располагали данными, что электрическая прочность вакуумных приборов на импульсном напряжении превышает их электрическую прочность на переменном или постоянном напряжении в 1,5 и выше раза. Это позволяло нам подавать на рентгеновскую трубку импульсное напряжение, например, в два раза превышающее ее статическое рабочее напряжение. Это приводило к значительному увеличению общего излучения трубки (пропорционально U^2) и уменьшению времени экспозиции. Хорошие результаты получались при применении высоковольтных рентгеновских трубок с радиационным охлаждением, рабочее напряжение которых составляло 180 *кв* и выше.

Преимуществом электронной рентгеновской трубки с накаливаемым катодом является возможность в значительных пределах регулировать электронный ток через трубку, а следовательно, и экспозицию.

Вторым важным преимуществом электронной трубки перед ионной является большая жесткость рентгеновских лучей, которые можно получать с помощью электронной рентгеновской трубки. Известно, что с увеличением жесткости рентгеновских лучей растет их проникающая способность при просвечивании вещества, а следовательно, сокращается экспозиция или при неизменной экспозиции возрастает толщина слоя просвечиваемого вещества.

Электроны, ускоренные под действием высокого напряжения, приложенного между электродами трубки, бомбардируют анод. Большая часть электронов, ударяющих об анод в процессе торможения, постепенно при многочисленных столкновениях с атомами вещества анода растрачивает свою кинетическую энергию. Энергия этих электронов идет на повышение температуры анода. Очень малая часть электронов-около 1% – быстро тормозится после небольшого числа столкновений с атомами вещества анода, и только при этом возникают рентгеновские лучи.

Доля кинетической энергии электронов, переносимой током через трубку и переходящей в рентгеновское излучение, зависит от величины ускоряющего напряжения, прилагаемого к полюсам трубки, и возрастает с повышением этого напряжения. Например, при напряжении 100 *кв* в энергию рентгеновского излучения переходит лишь 1,11% энергии, переносимой через трубку электронным током, при напряжении 150 *кв* – 1,64%, при напряжении 220 *кв* – 2,2%, а при напряжении 2000 *кв* – уже 5%. Расчеты также показали, что увеличение интенсивности излучения трубки не приведет к опасному перегреву анода. Это оправдалось на опыте. Одновременно с увеличением напряжения на электродах трубки мы увеличивали также электронный ток через нее путем увеличения тока накала катода на 50–80% и выше против нормального. Известно, что эффективность термоэлектронного катода, т. е. величина эмиссионного тока, отнесенная к единице мощности, затрачиваемой на накал, с повышением температуры быстро возрастает по показательному закону. Практически для катода из вольфрама эта величина лежит в пределах от 4 до 10 миллиампер на ватт мощности, затрачиваемой на накал.

В некоторых современных рентгеновских трубках для импульсного рентгенографирования величина тока через трубку достигает 1000 и больше ампер.

На рис. 1 изображена одна из электрических схем, служивших нам для синхронного генерирования импульсов рентгеновских лучей. Очерченная пунктиром схема удвоения напряжения является источником постоянного высокого напряжения, питающим собственно ударный контур, расположенный правее. Последний состоит из емкостей C_2 и C_2, шарового разрядника F, сопротивлений стекания R_2 и R_2, "хвостового" сопротивления R_3.

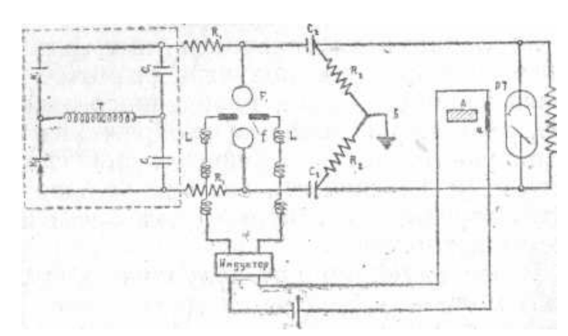


Рис. 1. *Электрическая схема для синхронного генерирования импульсов рентгеновских лучей с применением трубки с горячим катодом (по Воробьеву, 1937 г.)*

Трансформатор T, через кенотроны K_1 и K_1 заряжает емкости C_1 и C_1. Через зарядные сопротивления R_1 и R_1 заряжаются подключенные к ним левые обкладки конденсаторов C_2 и C_2. Одноименные электрические заряды, освобожденные на правых обкладках конденсаторов C_2 и C_2, стекают на землю через сопротивления R_2 и R_2.

Вследствие заземления правых обкладок конденсаторов C_2 и C_2 в точке b электроды рентгеновской трубки (PT) нормально также оказываются заземленными. В момент проскакивания искры в разряднике F и разрядки левых обкладок связанные заряды правых обкладок освобождаются и заряжают до высокого потенциала линию, а также подключенные к ней объекты (PT). Вместе с тем заряды в правой части схемы стекают по сопротивлениям R_2, R_2 и R_3. Наложение этих двух процессов: зарядки линии и стекания зарядов на землю и через сопротивление R_2, R_2 и R_3 приводит к формированию импульса напряжения на электродах рентгеновской трубки (PT). Длительность импульса напряжения регулируется путем изменения величин C_2, R_2 и R_3.

С уменьшением величины R_3 длительность импульса напряжения и его амплитуда будут быстро уменьшаться. В том случае, когда величина сопротивления превышает величину волнового сопротивления линии, будет иметь место явление отражения волны на конце линии и повышения напряжения на электродах трубки.

Для синхронизации момента подачи импульса напряжения с движением фиксируемого тела, была использована одна из многих возможных схем принудительного зажигания генератора импульсов.

Движущееся тело разрывает проводничек (фольгу, проволоку), включенную в первичную цепь индуктора в точке а. Экстраток размыкания, во вторичной цепи индуктора, вызывает возникновение импульса напряжения. Под действием этого импульса напряжения происходит пробой между вспомогательными электродами *f*. Ионизация этого промежутка в свою очередь вызывает искру в запальном разряднике *F* и работу схемы генератора импульсных напряжений. В результате на электродах рентгеновской трубки возникает импульс напряжения. С целью ограждения индуктора от проникновения волны перенапряжения высокой частоты и большой амплитуды, в цепь включались большие индуктивности *L*.

Примененная схема синхронизации действовала удовлетворительно. Для случая рентгенографирования движущейся пули разрываемую проволочку располагали на расстоянии 5–20 *мм* перед осью трубки. Ствол, из которого выходила пуля, необходимо было устанавливать на расстоянии 3–20 *мм* от нити. Если нить натягивается стволом, то, вероятно, после разрыва проволоки ее куски некоторое время скользят по телу пули, еще выходящей из ствола. Получается затяжной электрический контакт и медленный разрыв цепи. Это приводит в некоторых случаях к расстройству синхронизации и отсутствию изображения пули на снимке. Благодаря повышенной прочности изоляции на импульсах вся установка получается весьма компактной.

Для рентгенографирования пули в момент ее выхода из ствола удобнее применять другие схемы синхронизации.

Коммутацию высоковольтных цепей можно осуществлять, например, с помощью искросветового реле Стекольникова. Эти схемы позволяют производить отдельные включения с интервалами до 10^{-7}–10^{-8} *сек*.

Располагая в 1937 г. фотографической пленкой чувствительностью от 260 до 700 по *XD*, для улучшения качества снимков мы применяли сенсибилизацию фотопленки и флюоресцирующие экраны.

Изопанхроматическая пленка помещалась между двумя флюоресцирующими экранами в картонной или деревянной кассете и располагалась соответственно относительно трубки и снимаемого объекта. В наших опытах кассета помещалась обычно на расстоянии 150–200 *мм* от трубки, а в отдельных случаях и дальше. Рентгеновская трубка помещалась в свинцовый ящик, защищавший трубку от механических повреждений, а персонал – от рассеянного излучения.

Увеличивая длительность импульса напряжения, тем самым увеличивая экспозицию, мы получали размытое по оси изображение пули. Определяя величину пути, пройденного движущимся телом за время экспозиции, по степени размытия изображения находим скорость этого движения. Большую точность в определении скорости движения тела можно получить, если фиксировать два или больше его последовательных положений через определенные промежутки времени. Сооружение такой импульсной схемы возможно.

В последующем для получения импульсов рентгеновских лучей большой мощности другие авторы также применяли рентгеновские трубки двух типов.

1. Ионные трубки с холодным или накаливаемым катодом.
2. Электронные трубки и кенотроны с повышенной эмиссией накаливаемого катода.

В 1938 г. Кингдом и Танис опубликовали свои исследования по получению импульсов рентгеновского излучения при разрядке конденсаторной схемы через специальную импульсную рентгеновскую трубку с ртутным катодом. Исследуя биологическое действие рентгеновских лучей, эти авторы имели дело с широким пучком лучей.

Штеенбек, работая также с импульсной рентгеновской трубкой с ртутным катодом и анодом, предназначал их для просвечения металлов. Используя газовый разряд в капилляре, он получал большой ток через трубку порядка 1000 ампер. Узкий пучок электронов, хорошо фокусирующийся по оси капилляра, при бомбардировке анода давал пучок рентгеновских лучей, фокус которого имел площадь около 1 $мм^2$.

В 1940 г. Оостеркампф применил для целей импульсной рентгенографии рентгеновскую трубку с накаливаемым катодом. Так же, как и в наших опытах, применяя вольфрамовый катод при его кратковременном перекале, Оостеркампф увеличивал электронный ток через трубку с 0,4 до 20 ампер.

В 1942 г. Цукерман и Авдеенко в Институте машиноведения Академии Наук СССР применили кенотрон в качестве источника рентгеновских лучей большой интенсивности.

При прохождении через кенотрон большего тока увеличивается внутреннее падение напряжения в нем и возникают рентгеновские лучи. Их интенсивность может быть весьма велика. Например, мы в 1936 г. наблюдали при повышенной температуре катода кенотрона типа КР-220 излучение, с помощью которого

можно было производить обычное просвечивание, например, руки, ноги и проч. на большом расстоянии от кенотрона. Наблюдения производились с помощью обычного рентгеновского экрана.

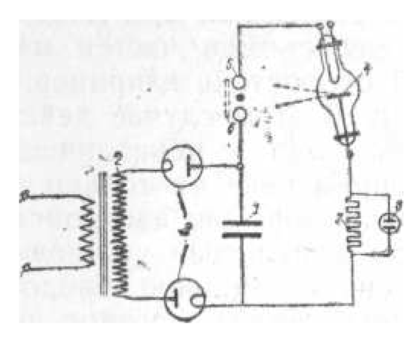


Рис. 2. *Электрическая схема генерирования импульсов рентгеновских лучей с применением кенотрона в качестве источника излучения (по Цукерману и Авдеенко)*

На рис. 2 представлена схема включения рентгеновской установки для возбуждения импульсов рентгеновских лучей с применением кенотрона в качестве источника излучения. Конденсатор 1 заряжается от трансформатора 2 через два кенотрона 3. Источником рентгеновских лучей служит кенотрон 4, включенный параллельно конденсатору 1. При замыкании микросекундного выключателя 5 происходит импульсный разряд конденсатора 1 через кенотрон 4. Импульс рентгеновского излучения от анода кенотрона 4 дает изображение объекта на экране 6. Падение напряжения на сопротивлений 7, даваемое импульсным током, наблюдается с помощью осциллографа 8. Таким путем измеряется величина импульсного тока.

В 1943 г. Альтшуллер в рентгеновской лаборатории Института машиноведения Академии Наук СССР предложил ультрасветосильный метод аксиального фокусирования пучков лучей и применение методов импульсной рентгенографии при структурном анализе. Таким образом импульсная рентгенография была применена к исследованию быстропротекающих структурных изменений в металлах и сплавах при механических напряжениях структуры, при фазовых превращениях и пр.

Для фиксирования мгновенных деформаций кристаллической решетки время экспозиции не должно превышать нескольких стотысячных долей секунды. Для изучения перехода аустенита в мартенсит необходимы импульсы рентгеновского излучения длительностью 10^{-4} сек. и меньше.

Разработаны методы одновременного фотографирования явлений в видимых и рентгеновских лучах. Для этого применяется свет искры, включающий рентгеновскую установку и импульс рентгеновского излучения. Рентгеновское и оптическое изображения при этом раздельно и в разных плоскостях фотографируются на рентгенопленке и фотопленке. В результате для одной и той же фазы процесса искра фиксирует, например при выстреле, внешние грани газовых потоков, а рентгенограмма позволяет судить о распределении в облаке основной массы вещества, поглощающей рентгеновские лучи.

Одновременное фотографирование процесса или движения тела с помощью видимого и рентгеновского излучения, разработанное в рентгеновской лаборатории Института машиноведения Академии Наук СССР Цукерманом, дает новые возможности для изучения кратковременных процессов, например, распространение ударных волн в газовой и жидкой средах, движение пули в непрозрачном облаке пороховых газов вблизи канала ствола и пр.

Включая импульсную установку последовательно много раз, можно также производить рентгенографирование тяжелых неподвижных объектов, которые снимаются и обычным статическим методом. В этом случае преимуществом импульсной рентгеновской установки является ее большая дешевизна и доступность по сравнению с необходимой статической установкой. Импульсная рентгеновская установка, являясь более мощным источником излучения, чем статическая на то же рабочее напряжение, позволяет также значительно сократить полное время экспозиции. Используя известное повышение электрической прочности изолирующих материалов и высоковольтных конструкций при воздействии импульсных напряжений, по сравнению со статическими напряжениями, можно конструировать компактные высоковольтные установки для импульсной рентгенографии.

Метод импульсной рентгенографии при многократном включении трубки может быть применен для съемки частей машин, вращающихся или движущихся с постоянной скоростью, например, ротор двигателя, турбины, поршни двигателя и пр. В этом случае действие импульсной установки должно быть синхронизовано с периодическим движением объекта. Установка может быть применена не только для целей дефектоскопии, но и для других целей, например, для настройки быстродействующих автоматов. Таким же образом импульсная установка при синхронном включении может быть применена в медицине, биологии и проч., например, при изучении пульсирующего сердца, органов дыхания и друг.

Так как компактные генераторы импульсных напряжений и схемы синхронизации-их работы в настоящее время технически разработаны хорошо, то пока возможности применения импульсной рентгенографии определяются рентгеновскими трубками. Необходима разработка мощной рентгеновской трубки на высокое рабочее напряжение, например, типа ускорительных трубок, применяемых в ядерной технике.

В качестве мощных источников весьма жестких рентгеновских лучей могут быть применены бетатронные установки, синхротроны, электростатические генераторы с движущейся лентой (статитроны) и каскадные генераторы.

В этих случаях ускорительные установки необходимо снабдить дополнительным контуром управления и синхронизации, позволяющим включать ее на заданный промежуток времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев А.А., Ончуков П.Н., Божко В.Ф. и Максимович Ф.Ф. Фотографирование пули, выходящей из канала ствола, с помощью рентгеновских лучей. Отчет о работе Сиб. физико-технического ин-та. Высоковольтная лаборатория, 6/VII 1937 г.
2. Воробьев А.А. Устройство для фотографирования быстро движущихся предметов с помощью рентгеновских лучей. Заявка на авторское свидетельство 10/III—1938 т. № 193/2. Отдел по делам изобретательства НКОП СССР.
3. Воробьев А.А. Применение рентгеновских лучей для фиксации и определения, скорости быстродвижущихся тел в непрозрачной среде. Труды Сиб. физико-технич. ин-та, 26, 168—172, 1949.
4. Стекольников И.С. Электронный осциллограф, Госэнергоиздат, 1949.
5. Цукерман В.А. и Авдеенко. Получение рентгеновских снимков с очень малым временем экспозиции. Журн. технич. физики, том 12, в. 4—5, 185—194, 1942.
6. Альтшуллер Л.А. Теория фокусирования аксиальных пучков и методы сверхскоростной структурной рентгенографии. Журн. эксперим. и теоретич. физики. 13, в. 11—12, 338—398, 1943.
7. Цукерман В.А. Рентгенографирование процессов взрыва и детонации. Докл. АН СССР, том 40, № 7, 305—308, 1943.
8. Страховский Г.Н. и Цукерман В. А. Схемы точной синхронизации при сверхбыстрых рентгеновских исследованиях. Изв. АН СССР, отд. техн. наук, № 3, 371/385, 1946.
9. Цукерман В.А. Комбинированный метод фотографирования очень быстрых процессов. Докл. АН СССР, том 53, № 4, 323—326, 1946.
10. Успенский Н.Е. Импульсный (сверхскоростной) метод в рентгенологии. Стенограмма публичной лекции, прочитанной в центральном лектории Всесоюзного общества по распространению политических и научных знаний, 1949.
11. Иванов А.А. Электровакуумная технология. Госэнергоиздат, 1944, С. 381—382.